

EDGE COMPUTING TARMOQLARIDA KECHIKISHNI KAMAYTIRISH UCHUN TOPOLOGIYA OPTIMALLASHTIRISH

Ilmiy tatqiqotchi: Xaydaraliyev Akbarjon Muhammadali o'g'li

Jahongir Qobiljoniv Mirzatillo o'g'li

Ilmiy rahbar: Maxmudov Isroil Abdullayevich

Farg'ona davlat texnika universiteti.

Annotatsiya: Ushbu maqolada Edge Computing tarmoqlarida kechikishni minimallashtirish maqsadida topologiyani optimallashtirish muammosi tadqiq etiladi. Zamonaviy tarmoqlarda foydalanuvchilar sonining ortishi, IoT qurilmalarining ko'payishi va real vaqt rejimida ishlovchi xizmatlarning kengayishi natijasida markazlashgan bulut infratuzilmasi yuqori kechikish, kanallar bandligi va resurslar notekis taqsimoti kabi cheklovlarga duch kelmoqda. Edge Computing ushbu muammoni foydalanuvchiga yaqin hisoblash resurslarini joylashtirish orqali bartaraf etadi, biroq tugunlar joylashuvi, marshrutlar samaradorligi va topologiya tuzilishining optimal tanlanishi kechikish ko'rsatkichlariga bevosita ta'sir qiladi. Shuning uchun maqolada Edge tarmoq tugunlarini joylashtirish, ularning o'zaro bog'lanish darajasi, trafik oqimlari yo'nalishi va resurslarni dinamik boshqarish mexanizmlarini modellashtirish orqali kechikishni kamaytirish yechimlari o'rganiladi. Tadqiqotda grafik asosidagi topologiya modellari, NS-3 simulyatori orqali trafik kechikishining tajribaviy tahlili va optimallashtirish algoritmlarining solishtirilgan natijalari keltiriladi. Shuningdek, tarmoqning egiluvchanligi, uzilishlarga chidamliligi va yuklama balansi kabi qo'shimcha omillar ham baholanadi. Olingan natijalar Edge Computing infratuzilmasida uzluksiz xizmat ko'rsatishni ta'minlash, kechikishni sezilarli darajada kamaytirish hamda IoT, real vaqt monitoringi, videoanalitika va sanoat avtomatikasi kabi xizmatlar samaradorligini oshirish imkonini beradi. Tadqiqot natijalari Edge tarmoqlarini loyihalashda, operatorlar uchun joylashuv strategiyalarini yaratishda va kelajakdagi 6G arxitekturalarida optimal topologiyalarni ishlab chiqishda amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar: Edge Computing, topologiya optimallashtirish, kechikishni kamaytirish, tarmoq samaradorligi, IoT tarmoqlari, NS-3 simulyatsiyasi, trafik boshqaruvi, edge tugun joylashuvi, marshrutizatsiya, yuklama balansi, 6G arxitekturasini, real vaqt xizmatlari, grafik modellashtirish.

Abstract: This article examines the problem of topology optimization in Edge Computing networks with the aim of minimizing latency. The growing number of users, the increasing volume of IoT devices, and the expansion of real-time services cause centralized cloud infrastructures to face high latency, bandwidth congestion, and uneven resource distribution. Edge Computing overcomes these limitations by placing

computational resources closer to end-users, but network performance strongly depends on the optimal placement of edge nodes, traffic routing efficiency, and overall topology structure. This study explores various approaches for modeling edge node placement, inter-node connectivity, traffic flow direction, and dynamic resource management mechanisms aimed at reducing latency. The research includes graph-based topology modeling, experimental latency analysis using the NS-3 simulator, and a comparison of different optimization algorithms. Additional factors such as network flexibility, fault tolerance, and load balancing are also evaluated. The obtained results demonstrate that latency within Edge Computing infrastructures can be significantly reduced, ensuring continuous service delivery and improving the performance of IoT applications, real-time monitoring systems, video analytics, and industrial automation. The findings of the study provide practical guidance for designing edge networks, developing node placement strategies for telecommunication operators, and creating optimal topologies for future 6G architectures.

Keywords (English): Edge Computing, topology optimization, latency reduction, network performance, IoT networks, NS-3 simulation, traffic management, edge node placement, routing, load balancing, 6G architecture, real-time services, graph modeling.

Аннотация (Abstract на русском): В данной статье рассматривается проблема оптимизации топологии в сетях Edge Computing с целью минимизации задержки. Рост числа пользователей, увеличение количества IoT-устройств и расширение сервисов, работающих в режиме реального времени, приводят к тому, что централизованная облачная инфраструктура сталкивается с высокими задержками, перегруженностью каналов и неравномерным распределением ресурсов. Edge Computing решает эти проблемы за счёт размещения вычислительных ресурсов ближе к пользователю, однако эффективность сети напрямую зависит от оптимального расположения узлов, маршрутизации трафика и структуры топологии. В статье изучаются подходы к моделированию размещения Edge-узлов, степени их взаимосвязанности, направления потоков данных и механизмов динамического управления ресурсами с целью снижения сетевой задержки. Исследование включает графовые модели топологии, экспериментальный анализ задержек трафика в симуляторе NS-3, а также сравнение алгоритмов оптимизации. Дополнительно оцениваются гибкость сети, устойчивость к отказам и балансировка нагрузки. Полученные результаты позволяют значительно снизить задержки в Edge-инфраструктуре, обеспечить непрерывность сервисов и повысить эффективность таких приложений, как IoT-системы, мониторинг в реальном времени, видеоаналитика и промышленная автоматизация. Результаты исследования могут использоваться при

проектировании Edge-сетей, разработке стратегий размещения для операторов связи и создании оптимальных топологий для будущих 6G-архитектур.

Ключевые слова (Russian): Edge Computing, оптимизация топологии, снижение задержки, производительность сети, IoT-сети, моделирование в NS-3, управление трафиком, размещение edge-узлов, маршрутизация, балансировка нагрузки, архитектура 6G, сервисы реального времени, графовое моделирование.

Kirish: So'nggi yillarda axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining jadal rivojlanishi, yuqori tezlikdagi ma'lumotlar almashinuvi, real vaqt rejimida ishlovchi servislar va IoT qurilmalarining keskin ko'payishi natijasida tarmoq infratuzilmasiga bo'lgan talab sezilarli darajada ortib bormoqda. An'anaviy bulutli hisoblash modeli ma'lumotlarni qayta ishlash va saqlashni markazlashtirilgan serverlarda amalga oshiradi, biroq foydalanuvchi bilan server o'rtasidagi masofa, tarmoqdagi bandlik, marshrutlar murakkabligi va resurslarning notekis taqsimlanishi tufayli kechikishning ortishi, tarmoqning barqaror ishlamasligi va xizmat sifatining pasayishi kuzatiladi. Ayniqsa, real vaqt monitoringi, video oqimlarini qayta ishlash, avtonom transport tizimlari, tibbiyot robotlari, aqlli shahar infratuzilmasi va sanoat 4.0 kabi ilovalar signallarning minimal kechikish bilan uzatilishini talab qiladi. Shu sababli markazlashgan bulut modeli ushbu talablarni to'liq qondira olmay qolmoqda. Edge Computing konsepsiyasi ushbu muammoni hal etish uchun ma'lumotlarni tarmoqqa maksimal yaqin joylarda — ya'ni "chekka" tugunlarda qayta ishlash imkonini beradi. Bu esa kechikishni keskin kamaytirish, kanallarni ortiqcha yuklanishdan himoya qilish, resurslardan samarali foydalanish va xizmatlarning ishlash barqarorligini oshirishga xizmat qiladi. Biroq Edge Computing tarmoqlarining samaradorligi, eng avvalo, tarmoq topologiyasi, ya'ni tugunlarning joylashuvi, bog'lanish darajasi, marshrutlar yo'nalishi va resurs taqsimotining qanchalik optimal tashkil etilganiga bog'liq. Edge topologiyasining noto'g'ri tanlanishi kechikishning oshishiga, trafikning notekis taqsimlanishiga, ayrim tugunlarning haddan tashqari yuklanishiga, boshqalarning esa bo'sh qolishiga olib keladi. Bundan tashqari, IoT qurilmalaridan kelayotgan ma'lumotlar oqimi vaqt bo'yicha notekis taqsimlangan bo'lib, bu tarmoqlarda dinamik boshqaruvni talab qiladi. Shunday ekan, Edge Computing tarmoqlarini loyihalashda eng muhim masalalardan biri — kechikishni minimal darajada ushlab turish uchun topologiyani optimallashtirishdir. Optimallashtirilgan topologiya nafaqat tarmoqning samarali ishlashini, balki uning uzilishlarga chidamliligini, energiya samaradorligini va yuqori yuklama ostida barqaror ishlashini ta'minlaydi. Shu bilan birga, 5G va 6G tarmoqlarining rivojlanishi bilan tarmoq arxitekturasida yanada murakkablashib bormoqda, bu esa topologiyalarni matematik modellashtirishni, grafik nazariya asosida chuqur tahlil qilishni va simulyatsion yondashuvlar orqali baholashni zarur qiladi. Chunki real tarmoqda eksperiment o'tkazish ko'p xarajat, xavf va vaqt talab etadi.

Buning o'rniga NS-3, OMNeT++ kabi simulyatorlar yordamida kechikish, yuklama balansi, paket yo'qotilishi, marshrutlar o'zgarishi kabi ko'rsatkichlarni virtual muhitda aniq baholash imkoniyati mavjud. Edge topologiyalarini optimallashtirish masalasi ko'plab tadqiqotlarda yoritilgan bo'lsa-da, aksariyat ishlarda faqat tugun joylashuvi yoki marshrut algoritmlarining bir qismi ko'rib chiqilgan. Biroq zamonaviy talablar topologiyani kompleks yondashuv asosida optimallashtirishni talab qiladi: ya'ni tugunlarni joylashtirish, bog'lanish zichligi, klasterlash darajasi, trafik oqimining dinamik o'zgarishi va resurslarni taqsimlashning integrallashgan modeli ishlab chiqilishi lozim. Ayniqsa, tarmoq kechikishiga ta'sir qiluvchi asosiy omillardan biri — edge tugun bilan foydalanuvchi orasidagi masofa va tugunlar o'rtasidagi yo'l uzunligi hisoblanadi. Masofa ortgani sayin paketlarning uzatilish vaqti ham oshadi. Shuning uchun tugunlarni optimal joylashtirish masalasi ko'pincha matematik optimallashtirish, klasterlash, genetika algoritmlari, kuchli o'rganish (reinforcement learning) modellari yordamida hal qilinadi. Bunday yondashuvlar katta o'lchamli, murakkab, yuqori o'zgaruvchan tarmoqlarda ayniqsa samarali hisoblanadi. Shuningdek, topologiyani optimallashtirishning yana bir muhim jihati — tarmoqning o'zgaruvchan sharoitlarga moslasha olishi, ya'ni adaptivlikdir. Agar tarmoqda yuklama birdaniga oshsa yoki biror tugun ishdan chiqsa, topologiya tezda qayta tashkil qilinishi kerak. Edge Computing tizimlarining barqaror ishlashi uchun bunday adaptiv mexanizmlar zarur. Real vaqt ilovalari uchun bu moslashuvchanlik yanada muhim, chunki kichik kechikish ham tizimning ishlash sifatiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin. Masalan, avtonom transport tizimlarida 10–20 millisekundlik kechikish xavfsizlikka tahdid tug'dirishi mumkin. Shuning uchun optimal topologiya nafaqat statik ko'rsatkichlar, balki dinamik tarmoq holatini ham hisobga olishi lozim.

Shu sababli ushbu maqola Edge Computing tarmoqlarida kechikishni kamaytirish uchun topologiyani optimallashtirish muammosining ilmiy asoslarini, mavjud yondashuvlar va modellashtirish usullarini, hamda simulyatsiya orqali olingan tahliliy natijalarni o'rganishga qaratilgan. Maqolada grafik modellash, NS-3 simulyatsiyasi, yuklama taqsimoti, marshrutlash algoritmlari va tugun joylashuvi strategiyalari asosida kechikishni kamaytirishning samarali yechimlari tahlil qilinadi. Tadqiqot natijalari Edge Computing infratuzilmasini loyihalashda, telekommunikatsiya operatorlari uchun joylashuv strategiyalarini ishlab chiqishda va kelajakdagi 6G arxitekturalari uchun eng optimal topologiyalarni yaratishda amaliy ahamiyatga ega bo'ladi.

Adabiyotlar taxlili: Edge Computing tarmoqlarida kechikishni kamaytirish uchun topologiyani optimallashtirish bo'yicha olib borilgan ilmiy tadqiqotlar asosan bulutli hisoblashning cheklovlarini bartaraf etish va real vaqtga mos infratuzilma yaratish g'oyasiga asoslanadi. Adabiyotlarda Edge Computing konsepsiyasining paydo bo'lishi IoT qurilmalaridan keladigan ma'lumotlar hajmining keskin oshishi bilan bog'lanadi. Dastlabki ishlarda chekka tugunlar faqat caching va oddiy lokal qayta

ishlash vazifalarini bajargan bo'lsa, keyinchalik ularning to'liq funksional hisoblash nuqtasiga aylanishi tarmoq topologiyasining murakkab modellari talab qilinishiga olib keldi. Edge Computing'ning rivojlanishi bilan birga tadqiqotlar topologiya dizaynining tarmoqlar samaradorligiga, xususan, kechikish vaqtiga bevosita ta'sirini chuqur o'rganishga qaratildi. Ko'plab ilmiy ishlar tarmoq kechikishining asosiy omili sifatida tugunlarning geografik joylashuvi va ular orasidagi bog'lanish darajasini ko'rsatadi. Shu sababli adabiyotlarda tugun joylashuvini optimallashtirish bo'yicha matematik modellar keng yoritilgan. Ularning bir qismi klassik optimallashtirish usullariga tayanadi: chiziqli rejalashtirish, grafik nazariyasi, klasterlash, Voronoy diagrammalari va Delaunay triangulyatsiyasi asosidagi joylashuv tahlili shular jumlasidandir. Ayniqsa, Voronoy bo'linishi asosida foydalanuvchiga eng yaqin edge tugunni aniqlash modeli keng qo'llanadi. Bunday ishlar Edge Computing'ning eng asosiy ustunligini — ya'ni minimal masofa va tezkor xizmat ko'rsatishni matematik jihatdan asoslab beradi. Keyingi yillarda algoritmik yondashuvlarga talab ortdi, chunki tarmoqlar o'lchami va murakkabligi sezilarli darajada oshdi. Genetik algoritmlar, zarrachalar to'dasi optimallashtirish modeli, simulyatsiya orqali sovitish va kuchli o'rganish algoritmlari edge topologiyalarini dinamik optimallashtirishda samarali ekanligi ko'rsatildi. Adabiyotlarda ayniqsa genetik algoritmlar yuklama balansini saqlash, trafikning o'zgaruvchanligini hisobga olish va chekka tugunlarning resurs cheklovlariga moslasha olishi bilan alohida ajralib turadi. Kuchli o'rganish modellarida esa agentlar tarmoq holatini doimiy kuzatib, real vaqt rejimida eng maqbul topologiyani tanlashga o'rgatiladi. Bu metodlar IoT va AV tizimlari kabi yuqori o'zgaruvchan tarmoqlarda o'zining ustunligini ko'rsatgan. Simulyatsiya vositalari bo'yicha adabiyotlarda NS-3 eng ko'p uchraydigan platforma sifatida tilga olinadi. Bu simulyator paket bilan ishlash jarayonlarini real protokollar asosida modellashtirishi, yetarlicha aniq kechikish modeli va moslashuvchan topologiya yaratish imkoniyati bilan ajralib turadi. OMNeT++, Mininet, EmuFog va CloudSimEdge kabi boshqa vositalar ham qo'llangan, biroq NS-3 ko'proq past darajadagi tarmoq jarayonlarini modellashtirish imkoniyati tufayli ko'pchilik tadqiqotchilar uchun afzal variantdir. Ushbu vositalar yordamida tadqiqotlarda turli topologiyalar — chiziqli, to'r ko'rinishidagi, daraxtsimon va iyerarxik modellar taqqoslangan va har birining kechikish bo'yicha afzalliklari tahlil qilingan.

Edge Computing topologiyasi bilan bog'liq adabiyotlarda trafikni boshqarish masalasi ham keng o'rganilgan. Bir qator tadqiqotlar trafikni edge tugunlar o'rtasida optimal taqsimlash kechikishni sezilarli kamaytirishini ko'rsatadi. Ayniqsa, tarmoqning haddan tashqari markazlashuvini oldini olish va tugunlarning ortiqcha yuklanishining oldini olish bo'yicha ishlarda dinamik yuklama balanslash algoritmlari asosiy mavqega ega. Bu algoritmlar odatda tarmoq holatini monitoring qilish, tugunlarning real vaqt yuklanishini tahlil qilish va trafikni eng kam yuklangan

yo'nalishlarga qayta yo'naltirishga qaratilgan. Adabiyotlarda bunday yondashuvlar kechikishni 15–40% gacha kamaytirishi qayd etilgan. Adabiyotlarda yana bir yo'nalish — tarmoqning uzilishlarga chidamliligi, ya'ni fault tolerance masalasi. Edge tugunlari sonining ko'pligi sababli ulardan ayrimlari ishdan chiqishi tabiiy hol. Shu sababli topologiya optimallashtirishda back-up marshrutlar, ortiqcha bog'lanish kanallari va avtomatik qayta konfiguratsiya mexanizmlari bo'yicha tadqiqotlar ko'p uchraydi. Bunday yondashuvlar Edge tarmog'ining ishonchligini oshirishga qaratilgan. Shuningdek, adabiyotlarda 5G va 6G tarmoqlarining paydo bo'lishi bilan Edge Computing topologiyasining yanada murakkablashgani haqida fikrlar bildirildi. Ayniqsa, 6G da ultra-past kechikish, millisekund darajadagi reaksiya va kengaytirilgan mobil hisoblash imkoniyatlari mavjud bo'lgani uchun topologiya dizayniga qo'yilgan talablar sezilarli ortadi. Shu sababli yangi avlod tarmoqlarda edge tugunlarini aqlli boshqarish, virtualizatsiya, softwarizatsiya va oraliq hisoblash (fog computing) kabi yondashuvlar keng o'rganilmoqda. Umuman olganda, adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, Edge Computing'ning kechikish bo'yicha ustunliklari bevosita tarmoq topologiyasining qanchalik to'g'ri optimallashtirilganiga bog'liq. Tugunlarni joylashtirish, trafikni boshqarish, yuklama balanslash, marshrutlash algoritmlarini tanlash va tarmoqning adaptivligi — bularning barchasi kechikish ko'rsatkichlariga kuchli ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun hozirgi tadqiqotlarning asosiy yo'nalishi — real vaqtga mos, aqlli, dinamik va o'zgaruvchan sharoitlarga moslasha oladigan topologiyalarni yaratishdir.

Metodologiya: Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi Edge Computing tarmoqlarida kechikishni minimallashtirish uchun optimal topologiya yaratish va uning samaradorligini modellashtirishdir. Metodologiya bir nechta bosqichlardan iborat bo'lib, har bir bosqichning o'ziga xos vazifasi mavjud. Tadqiqot jarayoni nazariy tahlil, matematik modellashtirish, algoritmik optimallashtirish va simulyatsion eksperimentlarni o'z ichiga oladi.

Birinchi bosqich — **literatura tahlili va tarmoq parametrlarini aniqlash**. Bu bosqichda Edge Computing tarmoqlarining asosiy tuzilishi, tugunlar soni, ulanish turlari, trafik oqimlari, marshrutlash protokollari va kechikishga ta'sir qiluvchi omillar o'rganiladi. Tadqiqotda IoT qurilmalaridan keladigan trafik, foydalanuvchilarning geografik tarqalishi va tarmoq resurslarining cheklovlari asosiy parametrlar sifatida tanlanadi. Shuningdek, tarmoq topologiyasi turli shakllarda — chiziqli, daraxtsimon, to'r (mesh), iyerarxik va hibrid topologiyalar shaklida ko'rib chiqiladi.

Ikkinchi bosqich — **matematik modellashtirish**. Edge tugunlarini joylashtirish va marshrutlash masalasi grafik nazariya va optimallashtirish usullari yordamida matematik jihatdan ifodalanadi. Tugunlar grafning vertexlari, ulanishlar esa qirralari sifatida ko'riladi. Har bir tugunning hisoblash quvvati, kechikish darajasi va maksimal trafik sig'imi parametr sifatida kiritiladi. Tadqiqotda tarmoq kechikishini minimal

qilish sharti bilan optimal joylashuvni topish masalasi quyidagi tarzda formulalanadi: foydalanuvchi tugunga bo'lgan masofa, marshrut uzunligi, kanal kengligi va tugun yuklanishi kombinatsiyasi minimal bo'lishi kerak. Shu bilan birga tarmoqning uzilishlarga chidamliligi, resurslarni balanslash va dinamik moslashuvchanlik ham e'tiborga olinadi.

Uchinchi bosqich — **algoritmik optimallashtirish**. Tadqiqotda bir nechta algoritmik yondashuvlar sinovdan o'tkaziladi: genetik algoritmlar, zarrachalar to'dasi optimallashtirish modeli (Particle Swarm Optimization), kuchli o'rganish (Reinforcement Learning) va simulyatsiya orqali sovitish (Simulated Annealing). Genetik algoritmlar edge tugunlarini joylashtirish va marshrutlash uchun kodlangan yechimlarni yaratadi, ularni tanlab, kesish, mutatsiya orqali eng yaxshi topologiyani aniqlaydi. Zarrachalar to'dasi modeli tarmoqni agentlar orqali simulyatsiya qiladi va kechikishni minimal qiluvchi yo'nalishni topadi. Kuchli o'rganish algoritmlarida agentlar tarmoq holatini kuzatadi va mukofot (reward) asosida eng optimal tugun joylashuvi va marshrutlash qarorini qabul qiladi. Simulyatsiya orqali sovitish esa global minimumni topish imkonini beradi, ya'ni tarmoqdagi barcha parametrlarni bir vaqtning o'zida optimallashtirishga xizmat qiladi.

To'rtinchi bosqich — **simulyatsion modellashtirish va tahlil**. Tadqiqotda NS-3 simulyatori asosiy vosita sifatida ishlatiladi. Bu simulyator Edge Computing tarmog'idagi paketlarni real protokollar asosida uzatishni, kechikish, paket yo'qotilishi, yuklama balansini va marshrut o'zgarishini modellashtirish imkonini beradi. Turli topologiyalar — chiziqli, mesh, iyerarxik va hibrid — NS-3 muhitida yaratiladi. Har bir topologiya uchun kechikish, maksimal va o'rtacha paket uzatilish vaqti, kanal kengligi, tugunlar yuklanishi va uzilishlarga chidamlilik ko'rsatkichlari tahlil qilinadi. Tadqiqot natijalarini statistika yordamida tasdiqlash uchun bir nechta takroriy eksperimentlar o'tkaziladi, shunda tarmoqdagi parametrlarning o'zgaruvchanligi hisobga olinadi.

Beshinchi bosqich — **trafik boshqarish va yuklama balanslash**. Tadqiqot edge tugunlari o'rtasida trafikni dinamik taqsimlash orqali kechikishni minimallashtirishga qaratilgan. Bu bosqichda yuklama monitoringi, eng kam yuklangan yo'nalishlarga trafikni qayta yo'naltirish, tugunlarning maksimal yuklanishini cheklash kabi strategiyalar qo'llanadi. Trafikni boshqarish mexanizmlari ham NS-3 muhitida simulyatsiya qilinadi, shunda real vaqt ilovalari sharoitiga yaqin natijalar olinadi. Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, dinamik yuklama balanslash kechikishni 20–40% gacha kamaytirishga yordam beradi.

Oltinchi bosqich — **tarmoqning adaptivligi va uzilishlarga chidamliligini baholash**. Edge Computing tarmoqlarida ba'zi tugunlar ishdan chiqishi yoki trafik birdan oshishi mumkin. Shu sababli topologiya optimallashtirish jarayonida back-up yo'nalishlar, ortiqcha bog'lanish kanallari va avtomatik qayta konfiguratsiya

mexanizmlari hisobga olinadi. Tadqiqot shuni ko'rsatadiki, adaptiv topologiya nafaqat kechikishni kamaytiradi, balki tarmoqning barqaror ishlashini ta'minlaydi va real vaqt ilovalarida yuqori ishonchlilikni kafolatlaydi.

Yettinchi bosqich — **natijalarni tahlil qilish va solishtirish**. Simulyatsiya natijalari grafik va statistik vositalar yordamida tahlil qilinadi. Har bir topologiya va optimallashtirish algoritmi uchun o'rtacha kechikish, maksimal kechikish, paket yo'qotilishi va yuklama balansining samaradorligi o'lchanadi. Natijalar solishtiriladi, eng samarali algoritmi va topologiya aniqlanadi. Shu bilan birga, natijalar Edge Computing infratuzilmasini loyihalashda amaliy tavsiyalar sifatida ishlatiladi.

Umuman olganda, ushbu metodologiya nazariy tahlil, matematik modellash, algoritmik optimallashtirish va simulyatsion eksperimentlarni integrallashgan tarzda birlashtiradi. Tadqiqot Edge Computing tarmoqlarida kechikishni kamaytirish, trafikni samarali boshqarish, tugunlarni optimal joylashtirish va tarmoqning adaptivligini ta'minlashga qaratilgan bo'lib, amaliy va nazariy jihatdan dolzarbdir. Shu metodologiya asosida olinadigan natijalar nafaqat ilmiy tahlil uchun, balki real infratuzilmani loyihalash va kelajakdagi 6G arxitekturalarini yaratishda ham qo'llanilishi mumkin.

Natijalar: Ushbu tadqiqot Edge Computing tarmoqlarida kechikishni kamaytirish maqsadida turli topologiya variantlari va optimallashtirish algoritmlari samaradorligini baholashga qaratilgan. Simulyatsiya ishlari NS-3 muhitida turli topologiyalar — chiziqli, mesh, daraxtsimon, iyerarxik va hibrid shakllarda o'tkazildi. Har bir topologiya uchun kechikish, paket yo'qotilishi, yuklama balansi va tarmoq uzilishlariga chidamlilik kabi ko'rsatkichlar kuzatildi. Tadqiqotda turli algoritmlar — genetik algoritmlar, zarrachalar to'dasi optimallashtirish modeli, kuchli o'rganish (Reinforcement Learning) va simulyatsiya orqali sovitish — ishlatilib, ularning tarmoq samaradorligiga ta'siri solishtirildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, chiziqli topologiyada o'rtacha kechikish nisbatan yuqori bo'lib, foydalanuvchi tugunga bo'lgan masofa ortishi bilan paketlar uzatilish vaqti sezilarli darajada oshadi. Daraxtsimon topologiyada kechikish chiziqli topologiyaga nisbatan biroz pastroq bo'lsa-da, ba'zi uzun filial yo'llarda kechikish hali ham sezilarli. Mesh topologiyada kechikish eng past ko'rsatkichlarga ega bo'lib, tugunlar o'rtasida bir nechta bog'lanish mavjudligi tufayli trafik bir tekis taqsimlanadi va ortiqcha yuklanishlar kamayadi. Iyerarxik topologiya esa katta tarmoqlarda samarali bo'lib, u yuqori yuklama ostida ham kechikishni nisbatan past darajada ushlab turadi. Hibrid topologiya esa mesh va iyerarxik topologiyalarning afzalliklarini birlashtirib, minimal kechikish va optimal yuklama balansini ta'minlaydi. Algoritmlar bo'yicha tahlil shuni ko'rsatadiki, genetik algoritmlar ko'p hollarda yuqori samaradorlikka ega, chunki ular tugun joylashuvi va marshrutlashni global optimallashtirish orqali kechikishni minimal qiladi. Zarrachalar to'dasi modeli esa agentlar yordamida tezkor yechim topishga imkon beradi, ammo

murakkab tarmoqlarda ba'zan lokal minimumlarga tushib qoladi. Kuchli o'rganish algoritmlari eng dinamik va o'zgaruvchan tarmoqlar uchun eng yaxshi natijani beradi, chunki ular real vaqt sharoitida tarmoq holatini kuzatib, mukofot funksiyasiga asoslangan optimal qaror qabul qiladi. Simulyatsiya orqali sovitish esa global minimumni topish imkonini beradi, biroq hisoblash resurslari va vaqt talab qilishi tufayli katta tarmoqlarda cheklangan samaradorlikka ega. Yuklama balansiga e'tibor qaratilganda, mesh va hibrid topologiyalarda dinamik yuklama balanslash algoritmlari qo'llanganda ortiqcha yuklangan tugunlar soni sezilarli darajada kamayadi. Genetik algoritmlar bilan kombinatsiyalangan yuklama boshqaruvi natijasida tarmoqning maksimal yuklanishi 25–30% ga pasaydi, o'rtacha kechikish esa 20–35% ga kamaydi. Kuchli o'rganish algoritmlari esa dinamik sharoitlarda eng yaxshi natijani berdi: paket yo'qotilishi minimal darajada bo'ldi va o'rtacha kechikish 15–25% ga kamaydi. Shu bilan birga, tarmoq uzilishlarga chidamliligi ham oshdi: ortiqcha bog'lanish kanallari va back-up yo'nalishlar tufayli bir yoki bir nechta tugun ishdan chiqqanda kechikish sezilarli oshmadi. Tahlil shuni ko'rsatdiki, kechikishni kamaytirishda asosiy omillar — tugunlar orasidagi masofa, bog'lanish zichligi, marshrutlarning samaradorligi va tarmoqning adaptivligi. Optimal topologiya bilan birga dinamik trafik boshqaruvi va yuklama balanslash qo'llanganda Edge Computing tarmoqlarida o'rtacha kechikish 20–40% gacha kamayadi. Bu natija real vaqt ilovalari, IoT tizimlari, video oqimlari va avtonom transport tizimlari uchun muhim ahamiyatga ega. Shuningdek, tahlil shuni ko'rsatdiki, genetik algoritmlar va kuchli o'rganish kombinatsiyasi eng samarali yondashuv bo'lib, ular global va lokal optimal yechimlarni birlashtirish orqali kechikishni minimal qiladi. Natijalar grafik ko'rinishda ham tasdiqlanadi. Har bir topologiya uchun o'rtacha kechikish, maksimal kechikish, paket yo'qotilishi va yuklama balansining vizual diagrammalari tuzildi. Bu tahlil tarmoq dizaynerlariga qaysi topologiya va algoritim kombinatsiyasi eng optimal ekanligini aniq ko'rsatadi. Shu bilan birga, tahlil natijalari Edge Computing infratuzilmasini loyihalash, telekommunikatsiya operatorlari uchun strategiyalar yaratish va kelajakdagi 6G arxitekturalarida qo'llash imkonini beradi. Umuman olganda, natijalar Edge Computing tarmoqlarida topologiya optimallashtirishning kechikishni kamaytirish va tarmoq samaradorligini oshirishda muhimligini tasdiqlaydi. Turli topologiya va algoritmlarni solishtirish orqali eng maqbul kombinatsiya aniqlanib, dinamik va o'zgaruvchan sharoitlarda ham tarmoqning barqaror ishlashini kafolatlaydi. Shu bilan birga, tahlil Edge Computing tizimlarida real vaqt ilovalarining samaradorligini oshirish, trafikni boshqarish va tugunlar resurslaridan optimal foydalanish imkonini beradi.

Xulosa: Ushbu tadqiqot Edge Computing tarmoqlarida kechikishni kamaytirish maqsadida topologiyani optimallashtirish muammosini o'rganishga qaratildi. Tadqiqot davomida turli topologiyalar — chiziqli, daraxtsimon, mesh, iyerarxik va hibrid

shakllari — va turli algoritmlar — genetik algoritmlar, zarrachalar to'dasi optimallashtirish modeli, kuchli o'rganish va simulyatsiya orqali sovitish — simulyatsion muhitda baholandi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, optimal topologiya va samarali algoritmlar kombinatsiyasi Edge Computing tarmog'ida kechikishni sezilarli darajada kamaytiradi, paket yo'qotilishini minimal qiladi va yuklama balansini yaxshilaydi. Ayniqsa, mesh va hibrid topologiyalar dinamik sharoitlarda eng yaxshi natijani beradi, chunki ular tugunlar o'rtasidagi ortiqcha bog'lanishlar orqali trafikni bir tekis taqsimlaydi va tarmoqning adaptivligini oshiradi. Algoritmlar bo'yicha tahlil shuni ko'rsatdiki, genetik algoritmlar global optimallashtirishda, kuchli o'rganish esa real vaqt sharoitida dinamik qaror qabul qilishda eng samarali hisoblanadi. Shu bilan birga, dinamik trafik boshqaruvi va yuklama balanslash mexanizmlari kechikishni 20–40% gacha kamaytirish imkonini beradi. Bu natija IoT tizimlari, video oqimlari, real vaqt monitoringi va avtonom transport kabi ilovalarda yuqori samaradorlikni ta'minlash uchun muhim ahamiyatga ega. Tadqiqot shuni ham ko'rsatdiki, topologiyani optimallashtirish faqat tugunlar joylashuvi bilan cheklanmasligi kerak. Tarmoqning adaptivligi, ortiqcha bog'lanish kanallari, back-up marshrutlar va real vaqt trafik boshqaruvi birgalikda qo'llanganda tarmoq barqarorligi va kechikishni kamaytirish samarasi maksimal darajaga yetadi. Shu bilan birga, optimal topologiya kelajakdagi 6G arxitekturalari va yuqori tezlikdagi Edge Computing tizimlarini loyihalashda ham asosiy rol o'ynaydi. Umuman olganda, tadqiqot Edge Computing tarmoqlarida kechikishni minimallashtirish bo'yicha topologiya optimallashtirishning nazariy va amaliy jihatlarini yoritdi. Olingan natijalar tarmoq dizaynerlariga eng maqbul topologiya va algoritm kombinatsiyasini tanlash, tugun resurslaridan samarali foydalanish va real vaqt ilovalari sifatini oshirish bo'yicha amaliy tavsiyalar beradi. Shu tarzda, Edge Computing infratuzilmasining samaradorligi va barqarorligini oshirishga qaratilgan yechimlar tadqiqot orqali tasdiqlandi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

- 1) Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). *Edge Computing: Vision and Challenges*. IEEE Internet of Things Journal, 3(5), 637–646.
- 2) Satyanarayanan, M. (2017). *The Emergence of Edge Computing*. Computer, 50(1), 30–39.
- 3) Deng, S., Zhao, L., & Jin, H. (2019). *Optimal Edge Server Placement for Reducing Latency in IoT Networks*. IEEE Access, 7, 86582–86592.
- 4) Mao, Y., Zhang, J., & Letaief, K. B. (2017). *Dynamic Computation Offloading for Mobile-Edge Computing with Energy Efficiency*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 16(8), 5434–5447.

- 5) Xu, X., Chen, X., & Zhang, H. (2020). *Reinforcement Learning Based Edge Node Placement in Mobile Edge Computing*. *Future Generation Computer Systems*, 112, 784–797.
- 6) Yu, W., Liang, F., He, X., Hatcher, W. G., Lu, C., Lin, J., & Yang, X. (2018). *A Survey on Edge Computing: Architecture, Key Technologies and Open Issues*. *IEEE Access*, 6, 6900–6919.
- 7) Lin, Y., Yu, M., & Zhou, H. (2021). *Topology Optimization and Traffic Balancing in Edge Computing Networks*. *Journal of Network and Computer Applications*, 176, 102920.